

УДК 621.828.9

В.А. Батлук д-р техн.наук, проф., І.В. Проскуріна, В.В. Батлук
Національний університет «Львівська політехніка» м.Львів, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ В ПРИСТРОЯХ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОТОКУ В ТЕХНОЛОГІЯХ МАШИНОБУДУВАННЯ

В статье приводится математическая модель процесса очищения пылегазового потока в центробежно-инерционных пылеуловителях и результаты ее реализации, которые подтверждены в сложных процессах пылеочистки, что применяются в технологиях машиностроения. Статья описывает новые тенденции в данном направлении, которые основаны на использовании центробежно-инерциальных сил, с целью повышения эффективности этого процесса.

In the article it is considered mathematical model of process of cleaning of dust-laden stream in centrifugal - inertia vehicles and results are resulted designs confirmed at conducted complex processes of dust collection in work of mashinbuilding. The article describes new trends in the development of dust catching apparatuses based on the use of centrifugal-inertial forces, permitting to improve significantly the effectiveness of dust catching.

Постановка проблеми. Щорічно, внаслідок господарської діяльності людства, утворюються десятки мільйонів тон промислових відходів у вигляді токсичних газів, які викидаються в атмосферу, і твердих техногенних продуктів, що забруднюють повітряне і водне середовище. Це призводить до глибоких негативних тенденцій і складає фундаментальну проблему сучасності, на рішення якої направлені, зусилля всіх розвинених країн світу.

Сьогодні в Україні при зменшенні загального техногенного навантаження на оточуюче середовище сумарні надходження забруднюючих речовин складають 900 млн. т на рік. Якщо в 2002 році розміри щорічних втрат в Україні від забруднення навколишнього середовища складали 15–20 % валового прибутку, то в 2008 році – вже 35% і досягли найвищого питомого забруднення на одиницю території в Європі (дані Швейцарського міжнародного інституту менеджменту оточуючого середовища), а вагомий внесок у ці цифри вносить машинобудівна індустрія.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі засоби для вловлення пилу від технологічного обладнання обробки матеріалів недостатньо ефективні і економічні. Для вирішення цієї задачі необхідні комплексні наукові дослідження по визначенню фізико-механічних, електричних і хімічних властивостей пилу, його концентрації і розподілу у виробничій техносфері з урахуванням метеорологічних умов навколишнього середовища. На основі цих досліджень потрібно провести теоретичне узагальнення і розробити теорію розділення гетерогенних систем в апаратах для очистки повітря від пилу, щоб на її основі сконструювати принципово нові типи пиловловлювачів з високою ефективністю пиловловлення, застосувавши нові принципи створення апаратів і агрегатів пилоочистки, що поєднують в одному апараті декілька рівнів очищення, заснованих на використанні відцентрових, інерційних і сил тяжіння або зміні фізичних параметрів пилу. Розміщення в корпусі апарату жалюзійного відокремлювача, як другого ступеня пилоочистки, дозволяє значно збільшити ефективність пиловловлення. Створення принципово нових апаратів сухого очищення повітря від пилу, які забезпечили б можливість вискоефективного уловлювання полідисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору і розмірів установок являється предметом наших досліджень.

На сьогоднішній день ця проблема залишається невирешеною і з кожним роком нагромаджується ряд першочергових задач, однією з яких є попередження і ліквідація шкідливих викидів різних машин.. Ця задача виросла в окрему проблему, вирішення якої, з одного боку, повинно сприяти поліпшенню

умов праці, а з іншого – поверненню викидів, зокрема пилоподібних, в технологічні процеси і їх використання в ряді виробництв, як повторні матеріальні ресурси. Розв'язання цієї проблеми може бути досягнуте створенням безвідходних технологій, безтрубних підприємств, принципово нових агрегатів і установок для очищення газів промислових підприємств від полідисперсного пилу, вловленням, подальшою повною утилізацією і використанням їх в різних технологічних процесах [1, 2].

Метою роботи є теоретичне узагальнення і нове наукове вирішення задачі – забезпечення високоефективного вловлення полідисперсного пилу шляхом створення принципово нових конструкцій апаратів для очищення повітря від пилу в технологіях машинобудування.

Виклад основного матеріалу. Рух зважених частинок в турбулентному потоці газу відрізняється складністю і інтенсивністю в усіх напрямках. Це зумовлене тим, що частинки, якщо вони не дуже великі, реагують на безладні турбулентні пульсації середовища і разом з поступальним рухом з потоком здійснюють під їх впливом пульсаційний (коливальний) рух відносно молей газу, який їх переносить і також безладне переміщення разом з молями газу, що називається турбулентною дифузією частинок.

Як і рух молей газу, пульсаційний і дифузійний рухи частинок мають стохастичний (випадковий) характер і тому описуються статистично. При нерівномірному русі стоксівської частинки в середовищі, що знаходиться в стані спокою, крім сили опору, що описує явища, які відбуваються в даний момент часу поблизу поверхні частинки, потрібно враховувати додатковий опір, пов'язаний з витратою енергії на приведення в рух самого середовища.

У обмежених умовах істотне значення набуває взаємодія частинок одна з одною (безпосереднє, при зіткненнях, а також через несуче середовище) і з обмежуючими потік стінками апарату. Зіткнення даної частинки зі стінкою або іншими частинками, наявність поперечного градієнта усередненої швидкості газу, неспівпадань центрів тяжіння частинок з центром прикладання сили аеродинамічного опору середовища, неоднорідності поля можуть спричинити обертальний рух їх.

Процес руху дрібних зважених частинок під дією відцентрової сили в турбулентному потоці складається з двох процесів: а) безперервного руху частинок до стінки циклону всередині несучих їх пульсаційних молей і б) безладного у напрямі, частоті і амплітуді руху частинок разом з несучими їх пульсаційними полями [3].

Перший процес – безперервний рух частинок до стінки циклону, описується в стоксівському наближенні рівнянням, виведеним для випадку вільного руху частинок в стаціонарному ламінарному потоці.

Другий процес – безладне снування частинок разом з несучими їх пульсаційними молями представляє вияв турбулентної дифузії частинок, інтенсивність якої залежить, як і швидкість їх руху під дією відцентрових сили, від маси частинок.

Якщо частинки грубодисперсні, то процес їх руху під дією відцентрових сили складається інакше. Володіючи високою відцентровою швидкістю, грубодисперсні частинки в ході процесу руху не залишаються всередині вихідного моля газу, а покидають його і перетинають безліч інших молей, що випадково зустрілися.

Руйнування великомасштабних турбулентних вихорів дозволяє апроксимувати рух пилогазового потоку макрохарактеристиками і дозволяє зробити висновок про можливість інтенсифікувати процес пилоочищення за рахунок встановлення всередині циклону жалюзійного відокремлювача, який інтенсифікує процес пилоочищення за рахунок трьох ефектів:

- первинного пилоосадження на поверхні жалюзі;
- руйнування великомасштабних турбулентних вихорів при їх проходженні через жалюзі відокремлювача і зменшення енергії транспортування ними пилу;
- зменшення зворотного дифузійного потоку від стінки циклону.

Розміри жалюзі і відстані між ними визначають лінійні масштаби і інші характеристики великовихрової турбулентності пилогазового потоку при їх зіткненні з жалюзями відокремлювача.

В статті поставлена задача про рух двофазного потоку в пиловловлювачі нової конструкції і здійснено її числову реалізацію. Числовий аналіз процесів динаміки можна здійснювати у тому випадку, коли закони, які описують процеси руху виражені у математичній формі, як правило у вигляді

диференціальних рівнянь. Кожне з таких рівнянь описує певний закон збереження в якому змінною є деяка фізична величина і відображається баланс між різноманітними факторами, які мають вплив на цю змінну. Зазвичай залежними змінними в таких диференціальних рівняннях є питомі властивості, тобто властивості, які відносяться до одиниці маси. Члени диференціального рівняння такого типу виражають дію на одиницю об'єму.

При дослідженні двофазного потоку в розробленій конструкції циклона для розрахунку були прийняті наступні допущення [4].

1. Частинки пилу є твердими і не взаємодіють між собою.
2. Частинка, що торкнулася до стінки корпусу, вважається уловленою;
3. На вході в апарат потік має рівномірне поле швидкості;
4. Розподіл пилу за площею вхідного патрубку циклону є рівномірним.
5. Опір рухові частинок в газовому середовищі описується законом Стокса.

7. Тангенціальна і осьова складові швидкості частинки співпадає з тангенціальною і осьовою складовими швидкості обертання газового потоку відповідно. Радіальні швидкості внаслідок дії сил інерції є різними.

Початковими умовами для даного апарату є характеристики повітряного середовища і характеристики пилу:

атмосферний тиск за нормальних умов $P_0 = 101325$ Па;

температура повітря за нормальних умов $T_0 = 293$ °С;

густина повітря $\rho_g = 1,293$ кг/м³;

середній (медіанний) діаметр частинок пилу $d50 = 5-20$ мкм;

максимальний діаметр частинок пилу $d_{max} = 30$ мкм;

мінімальний діаметр частинок пилу $d_{min} = 1$ мкм;

Турбулентний потік нестискуваної рідини в математичних моделях описується рівняннями Нав'є-Стокса. Якщо прийняти припущення, що $\mu = const$, рівняння Нав'є-Стокса можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= x - \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + v \Delta V_x + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \vec{V}; \\ \frac{dV_y}{dt} &= Y - \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + v \Delta V_y + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} \vec{V}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= Z - \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + v \Delta V_z + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div} \vec{V}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Домноживши рівняння системи відповідно на одиничні вектори i, j, k , а потім додавши їх одержимо рівняння руху у векторній формі

$$d\vec{V} / dt = \vec{G} - (1/p) \operatorname{grad} p + v \Delta \vec{V} + (v/3) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{V} \quad (2)$$

де вектор масових сил в декартових координатах:

$$\vec{G} = Xi + Yj + Zk;$$

Гradient тиску

$$\operatorname{grad} p = (\partial p / \partial x)i + (\partial p / \partial y)j + (\partial p / \partial z)k;$$

Вектори

$$\Delta \vec{V} = \Delta V_x i + \Delta V_y j + \Delta V_z k$$

$$\operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{V} = (\partial \operatorname{div} \vec{V} / \partial x)i + (\partial \operatorname{div} \vec{V} / \partial y)j + (\partial \operatorname{div} \vec{V} / \partial z)k$$

Якщо рідина не стискується, то $\operatorname{div} \vec{V} = 0$, як наслідок

$$d\vec{V} / dt = \vec{G} - (1/p) \operatorname{grad} p + v \Delta \vec{V}$$

При наявності масових сил

$$d\vec{V} / dt = -(1/p) \operatorname{grad} p + v \Delta \vec{V} + (v/3) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{V} \quad (3)$$

Вектор повного прискорення $d\vec{V} / dt$ можна представити у наступному вигляді

$$d\vec{V} / dt = d\vec{V} / \partial t + grad(V^2 / 2) + rot\vec{V} \cdot \vec{V} \quad (4)$$

З врахуванням рівнянь (3) і (4) рівняння руху перепишемо у наступному вигляді:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + grad \frac{V^2}{2} + rot\vec{V} \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\rho} grad p + \nu \Delta \vec{V} + \frac{\nu}{3} grad div \vec{V} \quad (5)$$

де: V – вектор швидкості; ρ – густина; P – тиск; g – вектор сили тяжіння.

У рівняннях (2) і (5) враховані головні нелінійні механізми еволюції турбулентних течій, інерційні сили і сила тяжіння.

Теплоперенос в моделі враховують за допомогою рівняння для ентальпії:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \mu_t \right) \nabla h \right) \quad (6)$$

Якщо припустити, що коефіцієнт теплоємності при постійному тиску c_p є константою, то рівняння Клапейрона можна переписати в наступному вигляді

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{c_p} h \quad (7)$$

де h – ентальпія (теплова функція), яка задається співвідношенням

$$h = \int_0^T c_p(T) dT$$

Найчастіше при цьому використовується степеневая залежність

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (8)$$

де T_0 і μ_0 – відповідно абсолютна температура і коефіцієнт в'язкості, що відповідають деякому початковому стану газу

$$n = \begin{cases} 1, & T < 90 K \\ 8/9, & 90 < T < 250 K \\ 3/4, & 250 < T < 600 K \\ 1, & T > 600 K \end{cases}$$

По Карману в середньому приймають $n=0,76$.

На частинки пилу при русі їх в закрученому потоці, з урахуванням раніше зроблених припущень, впливають наступні сили:

Сила тяжіння:

$$\overline{F_T} = m_q \cdot \overline{g} = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_e) \cdot \overline{g} \quad (9)$$

де m_q – маса частинки; g – прискорення сили тяжіння; d_q – діаметр частинки; ρ_q – густина частинок пилу; ρ_e – густина повітря.

Відцентрова сила:

$$\overline{F_c} = m_q \cdot \frac{\overline{V_{\tau t}}^2}{R} = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_e) \cdot \frac{\overline{V_{\tau t}}^2}{R}, \text{ Н} \quad (10)$$

де $\overline{V_{\tau t}}$ – тангенціальна складова швидкості обертання потоку повітря; R – радіус обертання потоку.

Як видно з приведених рівнянь (9, 10), різницею густин ($\rho_q - \rho_e$) враховується і сила витіснення середовища (сила Архімеда).

На руху в потоці газу частинку діє сила опору середовища (сила Стокса)

$$\overline{F_c} = 3\pi\mu_e d_q \overline{V_q} \chi, \quad (11)$$

де μ_z - динамічна в'язкість; V_q - швидкість осадження частинки щодо газового середовища; $\chi=2,9$ - динамічний коефіцієнт форми частинок пилу для змішаних тіл.

Якщо врахувати, що для зваженої частинки, рухомої в потоці газу сила Стокса F_c рівна сумі зовнішніх сил і направлена у зворотному напрямі, то:

$$\overline{F_c} = \overline{F_T} + \overline{F_q}. \quad (12)$$

Розкладемо сили (12) по осях y і z :

$$\begin{aligned} F_{cy} &= F_{iy} - F_T; \\ F_{cz} &= F_{iz}, \end{aligned} \quad (13)$$

Використовуючи рівняння (9, 10, 11 і 13), виразимо V_{iy} , V_{iz} - проекції швидкості осадження частинки щодо газового середовища на осі координат y і z :

$$V_{iy} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \left(\frac{V_T^2}{R} \cdot \cos(\alpha) - g \right)}{18\mu_z \chi}; \quad (14)$$

і

$$V_{iz} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \frac{V_T^2}{R} \cdot \sin(\alpha)}{18\mu_z \chi}, \quad (15)$$

де:

$$\sin(\alpha) = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \cos(\alpha) = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; R = \sqrt{y^2 + z^2}; \quad (16)$$

α - кут між віссю y і радіусом вектором точки, в якій знаходиться частинка;

y, z - координати точки в якій знаходиться частинка.

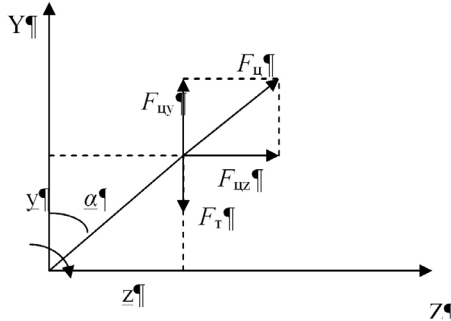


Рис. 1. Схема сил, що діють на частинку

З моделі турбулентного масопереносу описуваної співвідношеннями (1-7), одержуємо компоненти миттєвої швидкості потоку по осях координат V_x , V_y і V_z . Перетворимо їх в осьову, тангенціальну і радіальну складові швидкості для закрученого потоку повітря.

Осьова швидкість потоку в нашому випадку співпадатиме з віссю X :

$$V_{oc} = V_x. \quad (17)$$

Тангенціальна і радіальна швидкості потоку визначатимуться таким чином:

$$V_T = V_{zy} \cdot \cos(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot (\cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)) \quad (18)$$

і

$$V_p = V_{zy} \cdot \sin(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot (\sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \sin(\beta)), \quad (19)$$

де:

$$\begin{aligned} V_{zy} &= \sqrt{V_y^2 + V_z^2}; \\ \sin(\alpha) &= \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \quad \cos(\alpha) = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \\ \sin(\beta) &= \frac{V_y}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}; \quad \cos(\beta) = \frac{V_z}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}; \end{aligned} \quad (20)$$

α - кут між віссю Y і радіус вектором точки, в якій знаходиться частинка;

β - кут між віссю Z і вектором швидкості в даній точці;

Звідси одержуємо остаточні залежності для V_T і V_p :

$$V_T = \frac{y \cdot V_z - z \cdot V_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \quad (21)$$

$$V_p = \frac{z \cdot V_z + y \cdot V_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (22)$$

Підставивши (20) в (14) і (15), одержуємо залежність для V_{cy} і V_{cz} у кожній точці потоку:

$$V_{cy} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \left(\frac{y \cdot (y \cdot V_z - z \cdot V_y)^2}{(y^2 + z^2)^2} - g \right)}{18 \mu_c \chi}; \quad (23)$$

$$V_{cz} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \frac{z \cdot (y \cdot V_z - z \cdot V_y)^2}{(y^2 + z^2)^2}}{18 \mu_c \chi}; \quad (24)$$

Відповідно до прийнятих припущень з врахуванням рівняння (17):

$$V_{cx} = V_{oc} = V_x. \quad (25)$$

Одержавши компоненти V_{cx} , V_{cy} , і V_{cz} , ми можемо визначити в кожній точці потоку миттєву швидкість частинки щодо потоку:

$$\bar{V}_c = V_{cx} \bar{i} + V_{cy} \bar{j} + V_{cz} \bar{k}, \quad (26)$$

де \bar{i} , \bar{j} і \bar{k} – одиничні вектори позитивних напрямів осей.

Для модуля вектора швидкості \bar{V}_c маємо:

$$\bar{V}_c = \sqrt{V_{cx}^2 + V_{cy}^2 + V_{cz}^2}. \quad (27)$$

Одержимо швидкості частинки щодо прийнятої декартової системи координат:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{cx0} &= \bar{V}_x; \\ \bar{V}_{cy0} &= \bar{V}_{cy} + \bar{V}_y; \\ \bar{V}_{cz0} &= \bar{V}_{cz} + \bar{V}_z; \end{aligned} \quad (28)$$

Якщо розглядати швидкості в циліндровій системі координат, то:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{coc} &= \bar{V}_x; \\ \bar{V}_{ct0} &= \bar{V}_r; \\ \bar{V}_{cp0} &= \bar{V}_{cp} + \bar{V}_p, \end{aligned} \quad (29)$$

де V_{cp} одержуємо аналогічно перетворенням (17-21):

$$V_{cp} = \frac{z \cdot V_{cz} + y \cdot V_{cy}}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (30)$$

Одержана в (30) швидкість – це параметр, який характеризуватиме значення швидкості частинки пилу і напрям її руху, поміщену в ту або іншу точку простору циклону. Дані значення дозволять нам оцінити ефективність апарату за різних граничних умов, при різній геометрії циклону і при різних розмірах і масі частинок пилу.

Для підготовки розрахунку в програмі твердотільного моделювання створювалася тривимірною геометрична модель апарату.

Геометричні розміри циклона і жалюзійного відокремлювача є наступними (рис. 2): $R_1=0,7$; $H=0,7$; $r_1=0,4$; $r_2=0,3$. Де, R_1 – радіус циліндричної частини апарату, м; H – висота циліндричної частини апарату, м; r_1 та r_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси жалюзійного відокремлювача, м.

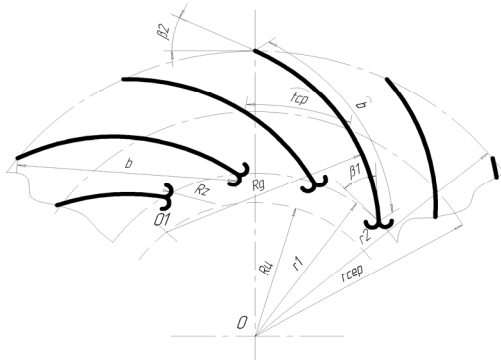


Рис. 2. Схема жалюзійного відокремлювача

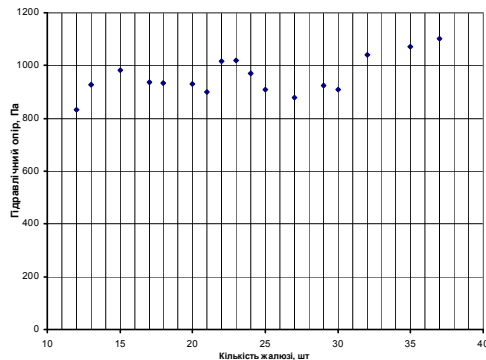


Рис. 3. Залежність гідравлічного опору циклона від кількості ґраток у жалюзійному відокремлювачі

При дослідженні впливу кількості жалюзі відокремлювача на гідравлічний опір пиловловлювача одержали залежність, наведену на рис. 3. Використання жалюзійного відокремлювача з кількістю жалюзі $z_p < 12$ є недоцільним, оскільки при цьому значно зростає крок жалюзі t_p , що в свою чергу призведе до зниження ефективності пиловловлювача. Дослідження проводили при швидкості потоку повітря у вхідному патрубку 18 м/с. При збільшенні числа жалюзі від 12 до 15 гідравлічний опір апарата ΔP зростає, після чого дещо спадає до значення $\Delta P \approx 950$ Па і до $z_p = 21$ є практично сталим. При кількості жалюзі 22-24 опір апарата різко зростає до значення $\Delta P = 1020$ Па, що може бути пояснено виникненням повітряних потоків у жалюзійному відокремлювачі.

Коли кількість жалюзі $z_p = 25-30$, гідравлічний опір циклона повертається до значення $\Delta P \approx 950$ Па. При збільшенні z_p понад 30 гідравлічний опір знову починає зростати, що може бути пояснено значним зменшенням щілини між жалюзі. Таким чином, як вказувалось вище, виникає необхідність визначення оптимальної кількості жалюзі z_{p0} , при якій гідравлічний опір циклона буде мінімальним за достатньої його ефективності. Значення z_{p0} залежить від продуктивності апарата та

співвідношення геометричних розмірів жалюзійного відокремлювача. У розглянутому прикладі різниця між гідравлічним опором ΔP циклона при $z_p = 21$ та $z_p = 22$ складає 18%; тому, з метою зниження енерговитрат на очищення при проведенні експериментів необхідно дослідити ефективність використання жалюзійного відокремлювача зі змінним кроком жалюзі.

Висновки. Завдяки математичній моделі, нам вдалося досягти значного збільшення (на 10-12%) ефективності вловлення дрібнодисперсного пилу у порівнянні з еталоном – циклоном ЦН-11, зменшивши при цьому гідравлічний опір (енергоємність) і витрати матеріалу (металоємність).

У даний час проводиться проектування дослідно-промислового зірця запропонованого апарата для впровадження його в технології машинобудування.

Список літератури

1. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочное издание. – М.: Металлургия.-1986.-544с.
2. Батлук В.А., Басов М.В., Проскуріна І.В. Стан питання боротьби з пилом при металургійних процесах//Науковий журнал «Екологічна безпека» Випуск 3-4 2008 р.117с. –с28-33
3. Батлук В.А. Математические модели процессов разделения гетерогенных систем при пылеочистке // Міжнар. наук. практ. конф. «Нові машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій, сучасні будівельні технології». – Полтава. – 2000. – с. 87-91.
4. Батлук В.А., Проскуріна І.В., Шальський Г.Г. Система обеспыливания в коксохимическом производстве// Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета, Випуск 20, Алчевск 2005, с. 218– 229